# 火　灾　研　究

[美] 纽约州立大学（石溪）力学系　S.L.Lee

## 1. 引　言

从人类的最早期起，火就既是朋友又是敌人．古代人可能在他经常出入的丛林中因闪电燃起了森林大火而发现了火，或者从远方看到了可怕的火山而害怕它，从而知道了火．当古代人最终学会钻木取火时就向前迈进了一大步．火的应用，使古代人有了可能离开灵长目动物聚集的热带，并且因此有可能在各种环境中得到发展．火供人取暖，烧熟食物．古代人还学会了用火狩猎或进行战争；学会了用火去烧死昆虫和清除低矮丛林以便更清楚地看见猎物和捕捉猎物．人如果不会用火，那就不可能有现代文明．

另一方面，尽管技术的进步改进了利用火和控制火的方法，但是，不希望发生的火灾却给人造成了越来越多的危害．例如，在过去10年当中，单在美国，火灾每年就夺走了11000多人的生命，直接的经济损失，单单建筑物火灾就超过15亿美元．因此，了解和控制自由燃烧火灾，在最近一些年中在世界上很多地方成为人们越来越关心的问题[1]．

火灾的发生取决于三个基本因素：燃料；点燃这些燃料所需的热量；维持燃烧的氧[2,3]．火灾属于众所周知的燃烧中的扩散火焰一类[4]，只是氧化剂不与燃料预先混合．火灾区别于一般扩散火焰的最重要的特点，是可能得到的可燃燃料受到从反应区（该区产生热量）到火床（该区产生可燃燃料）的热流所控制．火灾中的燃烧，是因为燃料与空气相混合，被加热，并发生释放出大量热量的反应．释放的一部分热量传回火床，产生更多的可燃燃料．与此同时，为了让新鲜空气流入以代替氧化剂而保持继续燃烧，燃烧产物必须从反应区移走．当具备充分的热量传递和质量传递反馈时，便可以维持这种周期性过程的不断进行．由于包含了以上这些固有的复杂性，所以在研究自由燃烧火灾方面的进展相当缓慢．在最近几年中，更多的工作是致力于描述一些可能较易处理的领域，在这些领域内，可以期望得到很丰富的成果．有关的工作主要包括，一方面是收集现场数据，另一方面则是研究实验室规模的火灾．

## 2. 实验室规模的火灾

蜡烛火焰大概是所有扩散火焰之中最为平凡的，它体现着自由燃烧火灾的许多基本原理．由火焰的热的燃烧区传递来的热量，使固体蜡转变为液体燃料．液体燃料靠毛细管的抽吸而进入烛芯，并靠从周围燃烧区供给的热量而使液体燃料在露在外面的烛芯段上蒸发．流出的燃料蒸气的数量，从而火焰的高度和体积，都可用调节烛芯长度来调整，就象从前使用的没有自动调节烛芯的牛油蜡烛要“剪掉烛花”那样．于是，所产生的燃料蒸气和周围空气中所含的氧相互向对方扩散，在燃烧区中发生反应．在燃烧区中生成燃烧产物，并伴随着释放出燃烧热．生成的热气体混合物因浮力而向上流动，在火焰上方形成自然对流飘缕（natural convection plume）．最后，这股飘缕引起环绕火焰的环流流场，既提供燃烧必



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

需的新鲜空气，又对火焰的几何形状产生影响。

由于这个原因，显然可见，简单的自由燃烧火灾的研究，应当包括三个相互有关的主要学科领域：由火床材料产生可燃燃料蒸气；扩散受控火焰；自然对流飘缕。当火床只有一部分包含在燃烧中时，火灾将以与支配简单自由燃烧火灾相同的机理蔓延到未燃烧区。此外，火灾的几何形状也造成进行定量分析的困难。而由于火灾的周围环境形成为其环流流场的一部分，所以，火焰的行为与如下一些环境因素密切联系着：地形；存在障碍物；在其有效的邻近区域存在着其他一些火灾；存在着盛行的周围空气流动及其结构。结果，自由燃烧火灾的研究虽然稳步地发展着，但却颇为缓慢，并且只限于相当简单的几何形状和环境条件下的研究。

在大多数自由燃烧火灾中，木材是重要的燃料。木材或类似木材的材料（如α纤维素等材料）的燃烧，一直是由火床材料产生可燃燃料蒸气的许多研究工作（主要是实验性研究工作）的中心课题。具体的范围，包括与材料内部热分解有关的热解作用[5-8]和着火机理[9,10]。已经着手对一些测量结果作出理论解释[6,10-13]。要对范围更广泛的木材或类似木材材料的有关过程取得更全面的定量的了解，还需要作很大的努力。

过去几年中，已经对火灾在火床上的蔓延进行了实验上和理论上的大力研究。这是因为它与经典燃烧气体动力学中详细研究过的，火焰通过可燃气体混合物的传播现象，在性质上明显相似。具体的研究范围，包括火灾沿着由连续的固体[14,15]、液体[16-18]、纸片[19-22]以及由离散的木块[23,24]所组成的火床而蔓延，包括火床倾斜的影响[18,20]和周围盛行风的影响[25,26]，还包括一些描述火灾蔓延的分析公式[2,27,28]。

考虑几何形状对非蔓延火灾行为的影响的最简单的方法，显然是利用水平的圆形火床。圆形液体燃料池上的火灾，从热量传递和质量传递的观点来看，是特别有意义的问题，并且已经是受到很多注意的中心[29-35]。在形状上仍然比较简单，但是非常不容易处理的更多有关的实际火灾，是几何形状简单的木垛上的自由燃烧火灾[36,37]。

环境情况对火灾的影响，由于包含着明显的复杂性，在相当广阔的范围内还没有系统地研究过。已经报道过的工作有，关于邻近火灾的影响[38]，周围风的影响[39]，环绕的围墙的影响[40]，以及关于来自下覆盖层火床的火灾[41]。非常清楚，当对诸如此类的以及其他的有关影响进行更多的研究时，将大大加强对火灾的了解。

从流体力学的观点来看，自然对流飘缕，特别在远离火焰区的区域中的自然对流飘缕，可能是火灾的最容易隔离出来进行研究的单元。这样的流场，通常有湍流流场，并且在可预见的将来，没有严格处理它的可能性。然而，有一种积分近似方法[42,43]利用了卷挟（entrainment）假设[44]。这种方法已经证明，在其适用范围内进行火灾的飘缕流场的分析是非常成功的[45-47]。实验结果支持了这种观点[46]。后来的理论工作进一步把辐射传递[48,49]和飘缕中产生的化学反应[50]结合了进去。在火灾飘缕研究方面的最新进展，包括在实验室中建立火焰旋涡（fire whirl）[51]和建立形成多个火焰旋涡的准则[52,53]。这种多个火焰旋涡的形成，可以用能处理更普遍问题的流体动力学不稳定性理论来说明[54]。旋扭飘缕（swirling plume）的理论[55]与首先应用于旋扭射流（swirling jet）的方法[56]相结合后，已经得到充分的实验支持[57]。在飘缕相互作用的领域方面，已经研究了在环形火灾上方的飘缕[58]。



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

### 3. 大规模火灾

近些年来，大规模火灾的消防工作，已经成为具有极大社会重要性、环境重要性和经济重要性的问题．因此，对大规模自由燃烧火灾的形成和蔓延的机理的了解，常常成为许多人大力从事研究的中心课题．大家公认，根据对小的实验室规模火灾的观察所得到的特征量，一般不能外推到猛烈的大规模火灾[59,60]．物理模拟原理的失效，主要是由于如下两个因素：火灾的图型不同；在大规模火灾中常常存在某种附加的蔓延机理，即飞火[1)]引燃（firebrand spotting）．

已经观察到大规模火灾是由许多小火灾构成的[50-51]．任何一个这些小火灾的直接的环境，都由邻近的火灾与其他周围物体所组成，我们称之为“邻近环境”，而把整个火灾的环境称为“总环境”．每个小火灾的行为，都受它的邻近环境的强烈影响，而邻近环境又受总环境的强烈影响．造成大规模火灾的所有小火灾释放的热量合在一起所产生的飘缕，会诱发出环流流场而控制着总环境．因此，大规模火灾的行为是具有一定图型的现象：在某一处的行为常常取决于另一处行为．

在大规模猛烈的火灾中，支配火灾蔓延的机理，常常是流场使飞火向远处传输．大量燃烧着的余烬所形成的“火星雨”，将位于猛烈燃烧区前方的一些区域点燃成二次火灾．当这些飞火引燃的火灾增大时，这些火灾彼此的反应增强，整个区域便很快被猛烈的燃烧所吞没．而不断产生的飞火仍将继续蔓延．

大规模火灾是显示出凶猛燃烧行为的火灾，它能够猛烈地喷发．不论在城市或乡村地区，着火源，以及燃料和天气的巧合，都是发生大规模火灾所必不可少的因素．这种猛烈的无法控制的火灾，可以将整片居民区夷为平地，毁灭宝贵的资源，伤害大批生命[61]．大规模火灾可以粗略地分为三类：①“**大火灾**(conflagration)”，通常定义为在风或地形的影响下移动其前锋而扩展的火灾，其热的燃烧区通常被限于比较浅窄的深度处．②“**风暴性大火灾**（fire storm）”，通常定义为其整个火灾区的许多部分同时燃烧的火灾，这种火灾基本上固定在一处，很少向外蔓延．其特征是有一高耸的对流柱并从所有四周吸入空气．第二次世界大战期间报道过这种猛烈的风暴性大火灾[62,63]，据认为，空气的吸入是使它没有显著向外蔓延的主要原因．③“**移动式风暴性大火灾**（moving fire storm）”，这是在风或地形的影响下蔓延的风暴性大火灾．在一定的燃料、风或地形条件下，大量的飞火可能将一个移动着的火灾的前方大片区域点燃．在这种情况下，这种火灾可以形成风暴性大火灾的许多特性，并且能够继续移动而进入尚未燃烧地区．这种火灾更多地发生在林野地区[64]，也可以由于地震、核爆炸之类的天然的或人为的灾祸而点燃面积非常大的地区．因而可以想见，移动式风暴性大火灾也可能在城市地区突然烧起．在这三类大规模火灾中，“大火灾”至少在概念上是可以搞明白的，而“风暴性大火灾”和“移动式风暴性大火灾”则可能是最危险的，破坏性最大，并且是最不能预先估算的．

#### 3.1 “大火灾”型大规模火灾蔓延的主要机理——短距离飞火引燃

这种火灾常常具有倾斜程度很大的飘缕．其主要蔓延机理是飞火从狭窄的猛烈燃烧的前锋区向着尚未燃烧的下风区前面传输，而不是象由实验室规模的火灾中所发现的那样，是热

1) 飞火指火灾中被风或对流气体带到远方落下的燃烧着的碎木块等固体．——校者



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量传递和质量传递的简单反馈过程．对简单形状的木块飞火的阻力和燃烧性能进行风洞试验所得的结果，已经用于从理论上确定这些飞火的飞行路线，确定这些飞火在受周围风作用的简单飘缕的理想流场中的寿命[65]．这种计算表明，非常有希望对上述现象得到某种定量的了解．

3.2 固定的"风暴性大火灾"扩展的主要机理——火焰旋涡的形成和有关飞火的活动

由于需要进行非常广泛而繁重的组织工作，所以只作了两次重要的探索性大规模风暴性大火灾试验．一次是"火炬计划（Project Flambeau）．于1964—1967年间在内华达和加利福尼亚的隔离的试验场进行[61]．它由燃料堆分散地分布在总尺度为5—50英亩范围的一系列燃烧组成．另一叫作"Eurokal演习"，于1969年10月在澳大利亚东北的昆士兰北部的一个试验场进行[66]，它是在一个大约52英亩的类似火床上的一次燃烧．这些试验的主要目的是提供大量的描述性资料，以及发展适于定量研究这种火灾的测试手段．然而，由这些试验获得的描述性资料，还是提供了可以清楚地表征风暴性大火灾这种独特的火灾图型的如下线索：

3.2.1 火灾区内对流柱的多发性 "在火灾最活跃的燃烧周期里，每一个火床都保持着一个分隔开的高度是变化着的对流柱．每个火床的对流柱常常可能破裂成两个或更多的对流柱……很可能，当火灾的规模增大时，吸入气流图型将有更多的机会得到扩展，于是可能产生更多这样的对流柱……与此同样的特征也出现在大片连续火床的火灾中．在火灾期间，这种对流柱随机地产生并到处移动"．

3.2.2 火灾区内部强烈的火焰旋涡和飞火的活动 "火灾迅速增大，当最初的那些火一消失，火焰旋涡便开始产生．火焰旋涡在尺度上和时间频率上都增大……在某些情况下，火焰旋涡可能是把飞火带入对流柱因而可能是引燃新的火灾的机理之一……在这些情况下，大的猛烈燃烧区很可能扩展，助长火焰旋涡的形成．火焰旋涡产生飞火的能力，可以使火灾蔓延．"

对于1964年3月在加利福尼亚南部靠近Santa Barbara的Polo山上发生的天然火灾的上述类型的活动情况，有如下的生动的描述[67,68]："当主火灾的二次火灾（spot fires）在Arroyo附近合并起来时，看到了许多小的旋风发生．由于全部燃烧着的灌木达5—10英尺高，所以产生了更多的许多二次火灾，并被带向高处，落进尚未燃烧的草木中．这些二次火灾增加了巨大的热量．火焰旋涡持续地形成，上升，并在顶部破裂．"

从上面这些描述显然可见，风暴性大火灾的最重要的特征之一，是在火灾区内各个局部的火焰旋涡和相关的飞火引燃活动对火灾的扩展起着主要作用．

对单个火焰旋涡的研究，揭示出了在简单的火灾跟周围空气的涡量之间相互作用的非常令人感兴趣的性质[2,51]．有关在火焰旋涡上方的湍流旋扭飘缕扩展问题，已经引起了很大的注意．关于这种流场的一个理论已经建立[55]，并且已为实际上重要的参数值范围内的实验所证实[57]．此外，在旋扭飘缕中炽热燃烧着的最简单形式的飞火，其轨迹和寿命都已经利用由风洞试验产生的必要的动力阻力和燃烧特性进行了研究[69,70]．其结果甚至更令人感兴趣，但不能预先计算．

最近，多个火焰旋涡的形成已经是一个广泛实验研究和理论研究的课题．通过把受控的周围涡量引入光滑的线状火灾中，并借助于与环流垂直轴平行的格网带，成功地产生了有周



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

期性间距的火焰旋涡带[52]．只有在超过 Reynolds 数（与周围的剪切力有关）与 Grashof 数（与火焰飘缕中的浮力有关）的幂的某一定的临界比值时，多个火焰旋涡才会扩展．这个发现使我们有了这样的希望：有可能把流体动力学的不稳定性理论富有成效地应用于这里，得出某种机理性的认识，把这种准二维系统改变其状态为产生规则有序的涡旋系统．这个观点得到了如下事实的支持：在静止空气中有一根长的水平柱体，在紧靠其上的液体薄膜表面上按特征间距出现均匀分开的波纹，有关预估出现这种现象的准则的问题已经取得成功[54]．以未扰动解为基础[71]，对于一个周围剪切场中的简单线状热源的上方的光滑飘缕，其不稳定性准则已经获得[72]．将这些计算应用于线状火灾的不稳定性，可以得到一个临界准则，这准则指出在哪些条件下可能观察到多个火焰旋涡现象，并揭示出可以期望得到有序涡旋形成的有选择的扰动扩大过程[53]．已经发现这些结果跟实验结果非常符合[52]．

大规模火灾中各个火焰的通常很复杂的绕流图型，是由普通的周围风[61,68]，地形障碍物，一些较简单情况中例示的飘缕间的相互作用[58,73]等的综合影响所引起的．总铅直涡量一般仅可能在某种强非对称情况中的大规模火灾里产生．非对称性可能在火床与有关地形的分布情况中出现，或者在非对称的边界条件中出现，最简单的例子是周围风．象“火炬”系列这样的受控制的试验[61]，曾经部署了大量的几何的对称和地形的对称．在这种试验中产生的任何总铅直涡量，都一定是普通的周围风引起的结果．然而，对于一个大规模的自然火灾来说，空间的和时间的热图型通常是不对称的，很可能，传导给大的总涡旋使其增长的那些流动图型将得到发展．

3.3 *“移动式风暴性大火灾”蔓延的主要机理——涡旋的形成和长距离飞火引燃活动*

由于存在着明显的危险性，所以总是力求进行不移动的风暴型大火灾试验．文献中报道过的唯一的天然移动式风暴性大火灾，是1967年初秋发生于爱达荷州北部的 Sundance 火灾[64]．这场火灾的规模之大，是很少同时出现的许多条件综合造成的结果：拖得很长的干旱期，持续的高温，火灾期间有速度高达45英里/小时的大风，无法控制的4英里长的火灾前锋．这些条件的综合，产生了迅速移动的风暴性大火灾．仅仅在9小时内，这场火灾便前进了16英里，火灾吞没了50000多英亩（约20000公顷）林地，释放出惊人的热量，烧倒和烧掉了千百棵大树，破坏了大量集水流域的蓄水能力．对24位目击者采访所提供的线索，给出了这次事变的许多重要的特征[74]．它们重复了同一地区1910年发生的大火灾的粗略的记录[75,76]．这些特征如下：

3.3.1 *强的盛行风与非常强的对流柱的耦合* 在整个主要火灾期间，盛行时速达30—45英里/小时的西南风．主燃烧区集中在一条大而深的河谷（Pack 河谷）中，河谷两岸是高山．燃烧是自然发生的并且非常猛烈．主对流飘缕在铅直方向保持相当大的高度（几千英尺），并且加速到相当大的铅直向速度以抗住山顶处盛行风的吹刮．“它铅直向上（被风刮歪了一点点），在顶部发出很大的轰鸣声．”“一位喷气飞机驾驶员说，估计对流飘缕底部有4—5英里宽（平均跨度约1英里）．它有35000英尺高（与广岛的飘缕同样高），并继续升高．他说，注意对流飘缕在其一半长度以上有多种颜色是很有趣的——是红色与棕色（可能是飞火）．他在离火场50英里处（正常距离的3倍）用红外探测器探到一个固定的火源．他说，尽管风速超过30英里/小时，但是，对流飘缕仍然竖直上升．”

3.3.2 *主对流飘缕尾流区中强涡旋脱落的活动* “风是主要的最可怕的东西．”“它是



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

突然喷出的，象波涛一样袭来，可以听到它的起动，然后穿过树林，一般来自西南方（主对流柱的方向）．旋风几乎是竖直的，很象实际的强大铅直对流．”“这些可怕的旋风尘柱（dustdevil）非常有规律地发生．”“各种树木被连根拔起，在一些地方，有着6—7英尺大的树墩的大雪松被整个刮倒．”“所有燃烧着的树木几乎都作水平移动——它们不是象鞠躬那样地弯下，倒象被拔出来之后又扔下去似的．它们几乎完全倒下，并且被吹刮着前进．”

3.3.3 主对流飘缕尾流区短距离飞火引燃 火苗抛出引起的二次小火灾估计在主火灾前方1/4—1/2英里处发生，一定时间内燃烧缓慢，然后吹来了风，整个火灾象爆炸似地迅猛扩展，形成熊熊燃烧的赤红火舌——然后迅速窜入新的未燃烧林区．”“大块余烬如同拳头那么大，实际上都是些燃烧着的大木块．”

3.3.4 主对流飘缕尾流区长距离飞火引燃 主对流柱下游10—11英里处有两个规模较大的二次火灾，其中之一“立即沿着各个方向蔓延”．“当它最初顺利蔓延时，好象是在一个大圆圈内在所有的方向燃烧着”（表明所降落的一个圆形图型的飞火极可能受一个巨大涡旋的影响）．应当指出，没有迹象表明，在短距离引燃区与长距离引燃区之间的区域里有飞火引燃活动．

从以上的描述可以合理地认为，移动式风暴性大火灾蔓延的主要载体，是一些带有飞火的移动着的涡旋柱，它们在主对流柱后面形成Karman型涡街[77]，如图1所示．对Sundance

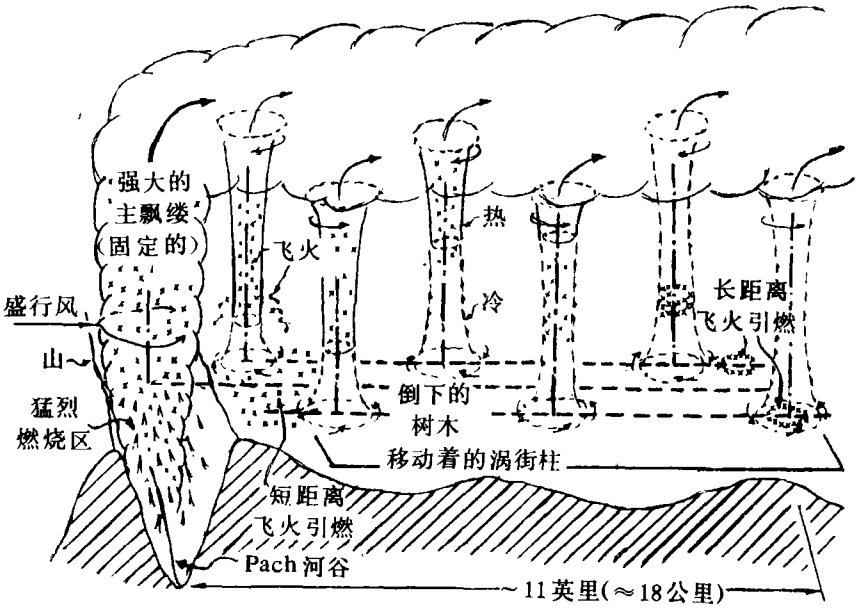


图1 Sundance火灾流动模型示意图

火灾中粗略估计的主流动参数与其总流动特性量的关联关系，跟Karman涡街的估计数据一致，并且在此区域内树木被吹倒的方向，也跟观察结果一致[78]．这一观点得到了30年前澳大利亚发生的那场大规模火灾的已有资料的有力支持[79]．那场火灾有6个极猛烈的移动式风暴性大火灾，它们的长距离飞火引燃活动远达20英里．也得到了文献[80]报道的在试验火灾后面观察到旋风发展的事实的有力支持．此外，在旋扭飘缕中飞火轨迹的结果[69,70]也表明，在移动着的涡旋柱的核心，为长距离引燃所需的飞火，很可能是稳定的，



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 4. 结　　语

最近几年，主要以与简单的实验室规模火灾有关的现象为基础而进行的火灾研究，有了显著的进展。一般说来，简单的实验室规模火灾的行为，不可能直接外推到大规模火灾中去（飘缕现象可能除外）[81]。然而，在较符合实际条件下进行的这类火灾的研究，可以成为了解大规模火灾的重要的组成部分。在大规模火灾的形成和蔓延中，涡旋流动以及有关的飞火活动，常常认为具有突出的重要性。

## 参　考　文　献


[1] Emmons, H. W., "Fire research—A trip report," Report No. 1, National Science Foundation Grant GK-771, Engineering Science Laboratory, Harvard University, 1966-1967.

[2] Emmons, H. W., "Fundamental problems of the free-burning fire," 10th Symposium (International) on Combustion, 951-961, 1965.

[3] Bell, W. G., "What basic fire research can learn from forest fires," *Proceedings of Society of American Foresters* **196**, 145-151, 1964.

[4] Lewis, B., and von Elbe, G., "Combustion, flames and explosions of gases," Academic Press, 1961; AMR **15** (1962), Rev. 2349.

[5] Blackshear, P. L., Jr., and Murty, K. A., "Heat and mass transfer to, from, and within cellulosic solids burning in air," 10th Symposium (International) on Combustion, 911-923, 1965.

[6] Tinney, E. R., "The Combustion of wooden dowels in heated air," 10th Symposium (International) on Combustion, 925-930, 1965.

[7] Murty, K. A., and Blackshear, P. L., Jr., "Pyrolysis effects in the transfer of heat and mass in thermally decomposing organic solids," 11th Symposium (International) on Combustion, 517-523, 1967; AMR **22** (1969), Rev. 5522.

[8] Panton, R. L., and Rittmann, J. G., "Pyrolysis of a slab of porous materials," 13th Symposium (International) on Combustion, 881-891, 1971.

[9] Martin, S., "Diffusion-controlled ignition of cellulosic materials by intense radiant energy," 10th Symposium (International) on Combustion, 877-896, 1965.

[10] Weatherford, W. D., Jr., and Sheppard, D. M., "Basic studies of the mechanism of ignition of cellulosic materials," 10th Symposium (International) on Combustion, 897-910, 1965.

[11] Roberts, A. F., "Problems associated with the theoretical analysis of the burning of wood," 13th Symposium (International) on Combustion, 893-903, 1971.

[12] Murty, K. A., and Blackshear, P. L., Jr., "Formulation of a comprehensive model for the [illegible] and combustion of solid fuels," Sec. I, Fire Research, Combustion Laboratory Technical Report No. 6, University of Minnesota, September, 1968.

[13] Browne, F. L., "Theories of the combustion of wood and its control — A survey of literature," USFPL Report No. 2136, 1958.

[14] McAlevy, R. F., III, and Magee, R. S., "The mechanism of flame spreading over the surface of igniting condensed-phase materials," 12th Symposium (International) on Combustion, 215-227, 1969.

[15] Lastrina, F. A., Magee, R. S., and McAlevy, R. S., III, "Flame spread over fuel beds: Solid-phase energy considerations," 13th Symposium (International) on Combustion, 935-948, 1971.

[16] Tarifa, C. S., and Torralbo, A. M., "Flame propagation along the interface between a gas and a reacting medium," 11th Symposium (International) on Combustion, 533-544, 1967; AMR **22** (1969), Rev. 5529.

[17] Tarifa, C. S., Del Notario, P. P., and Torralbo, A. M., "On the process of flame spreading over the surface of plastic fuels in an oxidizing atmosphere," 12th Symposium (International) on Combustion, 229-240, 1969.

[18] Kim, J. S., deRis, J., and Kroesser, F. W., "Laminar free-convective burning of fuel surfaces," 13th Symposium (International) on Combustion, 949-962, 1971.

[19] Hottel, H. C., and Williams, G. C., "The modeling of firespread through a fuel bed," 10th Symposium (International) on Combustion, 997-1007, 1965.

[20] Kinbara, T., Endo, H., and Sega, S., "Downward propagation of smoldering combustion through solid materials," 11th Symposium (International) on Combustion, 525-531, AMR **23** (1970), Rev. 1399.

[21] Emmons, H. W., and Shen, T., "Fire spread in paper arrays," 13th Symposium (International) on Combustion, 917-926, 1971.

[22] Hottel, H. C., Williams, G. C., and Kwentus, G. K., "Fuel preheating in free-burning fires," 13th Symposium (International) on Combustion, 963-970, 1971.

[23] Thomas, P. H., "Fire spread in wooden cribs: Part III, The effect of wind," Fire Research Note No. 600, Fire Research Station, Ministry of Technology and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization, U.K., June 1965.

[24] Thomas, P. H., "The contribution of flame radiation to fire spread in forests," Fire Research Note No. 594, Fire Research Station, Ministry of Technology and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization, U.K., November 1965.

[25] Anderson, H. E., and Rothermel, R. C., "Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires," 10th Symposium (International) on Combustion, 1009-1019, 1965.

[26] Berlad, A. L., Rothermel, R. C., and Frandsen, W., "The Structure of some quasi-steady fire-spread waves," 13th Symposium (International) on Combustion, 927-934, 1971.

[27] Albini, F. A., "A physical model for firespread in brush," 11th Symposium (International) on Combustion, 553-560, 1967.

[28] deRis, J., "Spread of a laminar diffusion flame," 12th Symposium (International) on Combustion, 241-252, 1969.

[29] Spalding, D. B., "Some fundamentals of combustion," London, Butterworths, 1955.

[30] Hottel, H. C., Review of "Certain laws governing diffusive burning of liquids," *Fire Research Abstracts and Reviews* **1**, 41-44, 1959.

[31] Emmons, H. W., "Some observations on pool burning," *International Symposium on the Use of Models in Fire Research*, Publication 786, National Academy of Science, 1961.

[32] Spalding, D. B., "The burning rate of liquid fuels from open trays by natural convection," *Fire Research Abstracts and Reviews* **4**, 234-236, 1962.

[33] Akita, K., and Yumoto, T., "Heat transfer in small pools and rates of burning of liquid methanol," 10th Symposium (International) on Combustion, 943-948, 1965.

[34] Tarifa, C. S., del Notario, P. P., and Valdes, E. C., "Open fires," Final Report of Grants FG-SP-114 and FG-SP-146 (Vol. 1), Instituto Nacional de Technica Aerospacial, "Esteban Terradas," Madrid, Spain, 1967.

[35] Wood, B. D., and Blacksheat, P. L., Jr., "Studies on mass fire model," Section II, Fire Research, Technical Report No. 6, Combustion Laboratory, University of Minnesota, September 1968.

[36] Gross, D., "Experiments on the burning of cross piles of wood," *Journal of Research*, National Bureau of Standards, **66C**, 99-105, 1962.

[37] Block, J. A., "A theoretical and experimental study of nonpropagating free-burning fire," 13th Symposium (International) on Combustion, 971-978, 1971.

[38] Thomas, P. H., Baldwin, R., and Heselden, A. J. M., "Buoyant diffusion flames: Some measurements of air entrainment, heat transfer, and flame merging," 10th Symposium (International) on Combustion, 983-996, 1965.




© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[39] Putnam, A. A., "A model study of wind-blown free-burning fires," 10th Symposium (International) on Combustion, 1039-1046, 1965.

[40] Gross, D., and Robertson, A. F., "Experimental fires in enclosures," 10th Symposium (International) on Combustion, 931-942, 1965.

[41] Orloff, L., and deRis, J., "Modeling of ceiling fires," 13th Symposium (International) on Combustion, 979-992, 1971.

[42] Morton, B. R., Taylor, G. I., and Turner, J. J., "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources," *Proceedings of the Royal Society (London)* **234**, 1-23, 1956; AMR **9** (1956), Rev. 2626.

[43] Morton, B. R., "Forced plumes," *Journal of Fluid Mechanics* **5**, 151-153, 1959.

[44] Taylor, G. I., "Dynamics of a mass of hot gas rising in air," U. S. Atomic Energy Commission, MDDC-919, LADC-276, 1945.

[45] Murgai, M. P., and Emmons, H. W., "Natural convection above fires," *Journal of Fluid Mechanics* **8**, 611-624, 1960; AMR **14** (1961), Rev. 3244.

[46] Lee, S. L., and Emmons, H. W., "A study of natural convection above a line fire," *Journal of Fluid Mechanics* **11**, 353-368, 1961; AMR **16** (1963), Rev. 1733.

[47] Morton, B. R., "Modeling fire plumes," 10th Symposium (International) on Combustion, 973-982, 1965.

[48] Murgai, M. P., "Radiative transfer effects in natural convection above fires," *Journal of Fluid Mechanics* **12**, 441-448, 1962; AMR **16** (1963), Rev. 1732.

[49] Smith, R. K., "Radiation effects on large fire plumes," 11th Symposium (International) on Combustion, 507-515, 1967; AMR **22** (1969), Rev. 5498.

[50] Nielsen, H. J., and Tao, L. N., "The fire plume above a large free-burning fire," 10th Symposium (International) on Combustion, 965-972, 1965.

[51] Emmons, H. W., and Ying, S. J., "The fire whirl," 11th Symposium (International) on Combustion, 475-488, 1967; AMR **22** (1969), Rev. 4560.

[52] Lee, S. L., and Garris, C. A., "The formation of multiple fire whirls," 12th Symposium (International) on Combustion, 265-273, 1969.

[53] Garris, C. A., and Lee, S. L., "A theory for multiple fire whirl formation," to be presented at 14th Symposium (International) on Combustion, 1972.

[54] Lee, S. L., "Taylor instability of a liquid film around a long horizontal cylindrical body in still air," *Journal of Applied Mechanics* **30**, 443-447, 1963; AMR **17** (1964), Rev. 5263.

[55] Lee, S. L., "Axisymmetrical turbulent swirling natural convection plume, Part I — Theoretical investigation," *Journal of Applied Mechanics* **33**, 647-655, 1966; AMR **20** (1967), Rev. 5034.

[56] Lee, S. L., "Axisymmetrical turbulent swirling jet," *Journal of Applied Mechanics* **32**, 258-262, 1965; AMR **18** (1965), Rev. 7539.

[57] Lee, S. L., "Axisymmetrical turbulent swirling natural convection plume, Part II — Experimental investigation," *Journal of Applied Mechanics* **33**, 656-661, 1966; AMR **20** (1967), Rev. 5035.

[58] Lee, S. L., and Ling, C. H., "Natural convection plume above a circular ring fire," 11th Symposium (International) on Combustion, 501-506, 1967, AMR **22** (1969), Rev. 5493.

[59] Countryman, C. M., "Mass fires and fire behavior," U.S. Forest Service Research Paper, PSW-19, 1964.

[60] Countryman, C. M., "Mass fire characteristics in large scale tests," *Fire Technology* **1**, 303-317, 1965.

[61] Countryman, C. M., "Project Flambeau—An investigation of mass fire (1964-1967), Final report — Volume I," Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 1969.

[62] Bond, H., "Fire and the air war," National Fire Protection Association, Boston, Mass., 1946.

[63] Ebert, C. H. V., "Hamburg's firestorm weather," *National Fire Protection Association Quarterly* **56**, 253-260, 1963.

[64] Anderson, H. E., "Sundance Fire: An analysis of fire phenomena," U.S. Forest Service Research Paper, INT-56, 1968.

[65] Tarifa, C. S., Del Notario, P. P., and Moreno, F. G., "On the flight paths and lifetimes of burning particles of wood," 10th Symposium (International) on Combustion, 1021-1037, 1965.

[66] Williams, D. W., et al, "Operation Euroka — An Australian mass fire experiment," Report 386, Defence Standards Laboratories, Australian Defence Scientific Service, Department of Supply, Commonwealth of Australia, Maribyrnon, Victoria, Australia, September 1970.

[67] Pirsko, A. R., et al, "Causes and behavior of a tornadic fire-whirlwind," U.S. Forest Service Research Note PSW-61, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California, 1965.

[68] Lohneiss, W. H., "Observations of a fire-generated vortex," *Fire Abstract and Reviews* **8**, 184-187, 1966; AMR **20** (1967), Rev. 6751.

[69] Lee, S. L., and Hellman, J. M., "Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume," *Combustion and Flame* **13**, 645-655, 1969; AMR **24** (1971), Rev. 3043.

[70] Lee, S. L., and Hellman, J. M., "Firebrand trajectory study using an empirical velocity-dependent burning law," *Combustion and Flame* **15**, 265-274, 1970.

[71] Garris, C. A., and Lee, S. L., "Laminar free convection above a line source of heat in an ambient shear field," to appear in publication, 1972.

[72] Garris, C. A., and Lee, S. L., "Instability criteria of a laminar free convection above a line source of heat in an ambient shear field," to appear in publication, 1972.

[73] Huang, W. C., and Lee, S. L., "Interaction of two parallel line fires," State University of New York at Stony Brook, College of Engineering Report No. 98, 1967.

[74] "Sundance Fire interviews," courtesy of Northern Forest Fire Laboratory, Missoula, Montana, October 1967.

[75] Koch, E., "History of the 1910 forest fires in Idaho and western Montana," courtesy of Northern Forest Fire Laboratory, Missoula, Montana.

[76] Halm, J. B., "The big fire," courtesy of Northern Forest Fire Laboratory, Missoula, Montana.

[77] Berlad, A. L., and Lee, S. L., "Long range spotting," Paper presented at the First Meeting of Eastern Section of the Combustion Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pa., November 27-28, 1968.

[78] Aerial photographs of Sundance Fire area, courtesy of Northern Forest Fire Laboratory, Missoula, Montana.

[79] McArthur, A. G., Forest Research Institute, Forest and Timber Bureau, Canberra, A.C.T., Australia, private communication, 1970.

[80] Glaser, A. H., "Tornado studies," Final Report, A.&M. Project 129, Ref. 57-3F., U.S. Weather Bureau Contract Cwb 8696, The A.&M. College of Texas, 1959.

[81] Lee, B. T., "Mass fire scaling with small electrically heated models," Meeting of the Central States Section, the Combustion Institute, University of Minnesota, March 1969.

**程屏芬　俞稼槃　张德华　董务民**译自：*Appl. Mech. Rev.*, **25**, 5 (1972)：503—509.（**董务民**校）



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net